

## РОТОРНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ АППАРАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Промтов М.А., д.т.н., профессор  
Зав. каф. «Машины и аппараты химических производств»  
Тамбовского государственного технического университета.

Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106, Тамбовский государственный технический университет, тел. (007-4752)-63-20-24, -63-27-28, , e-mail: [promtov@tambov.ru](mailto:promtov@tambov.ru)  
<http://www.tstu.ru/r.php?r=structure.kafedra&sort=&id=3>

Роторные импульсные аппараты (РИА) являются эффективным оборудованием для многофакторного импульсного воздействия на гетерогенную жидкость с целью получения стабильных, высокодисперсных эмульсий и суспензий, интенсификации процессов растворения и экстрагирования веществ, изменения физико-химических параметров жидкости, деструкции молекулярных соединений [1-3].

РИА используются для обработки таких систем как «жидкость-жидкость», «жидкость – твердое тело» и «газ – жидкость» за счет широкого спектра факторов воздействия:

- механическое воздействие на частицы гетерогенной среды, заключающееся в ударных, срезающих и истирающих нагрузках и контактах с рабочими частями РИА;
- гидродинамическое воздействие, выражающееся в больших сдвиговых напряжениях в жидкости, развитой турбулентности, пульсациях давления и скорости потока жидкости;
- гидроакустическое воздействие на жидкость осуществляется за счет мелкомасштабных пульсаций давления, интенсивной кавитации, ударных волн и нелинейных акустических эффектов.

Исторически сложилось, что роторные импульсные аппараты, в основу работы которых положены первый и второй факторы воздействия, называются роторно-пульсационными аппаратами (РПА), гидродинамическими аппаратами роторного типа (ГАРТ). Пульсационные аппараты, в основу работы которых положены второй и третий факторы воздействия, называются роторными аппаратами с модуляцией потока (РАМП), гидродинамическими сиренами (СГД). В последнее время часто встречается название роторно-импульсный аппарат (РИА), которым называют как РПА, так и РАМП. РПА эффективны для гетерогенных процессов с твердой фазой и вязкими жидкостями, а РАМП – в маловязких системах жидкость – жидкость. Необходимо отметить, что четкой границы по факторам воздействия между РПА и РАМП нет, и подобное разделение носит условный характер.

Характерными конструктивными признаками РПА является наличие нескольких последовательных роторов и статоров (многоступенчатость), а зазор между ротором и статором одной ступени лежит в пределах 0,2-1 мм. Для РИА характерна одна ступень – один ротор и один статор – с зазором 0,1-0,5 мм

и большим шагом расположения каналов в роторе и статоре по боковым стенкам ротора и статора. Наиболее активной рабочей зоной в РПА является зазор между ротором и статором, в РИА – каналы статора. Классификация РИА дана в [1, 3].

Стандартная схема РИА радиального типа показана на рис. 1. Принцип работы аппарата заключается в следующем. Обработанная жидкость подается под давлением или самотеком через входной патрубок 7 в полость ротора 1, проходит через каналы ротора 2, каналы статора 4, рабочую камеру, образованную корпусом 5 и крышкой 6 и выходит из аппарата через выходной патрубок 8.

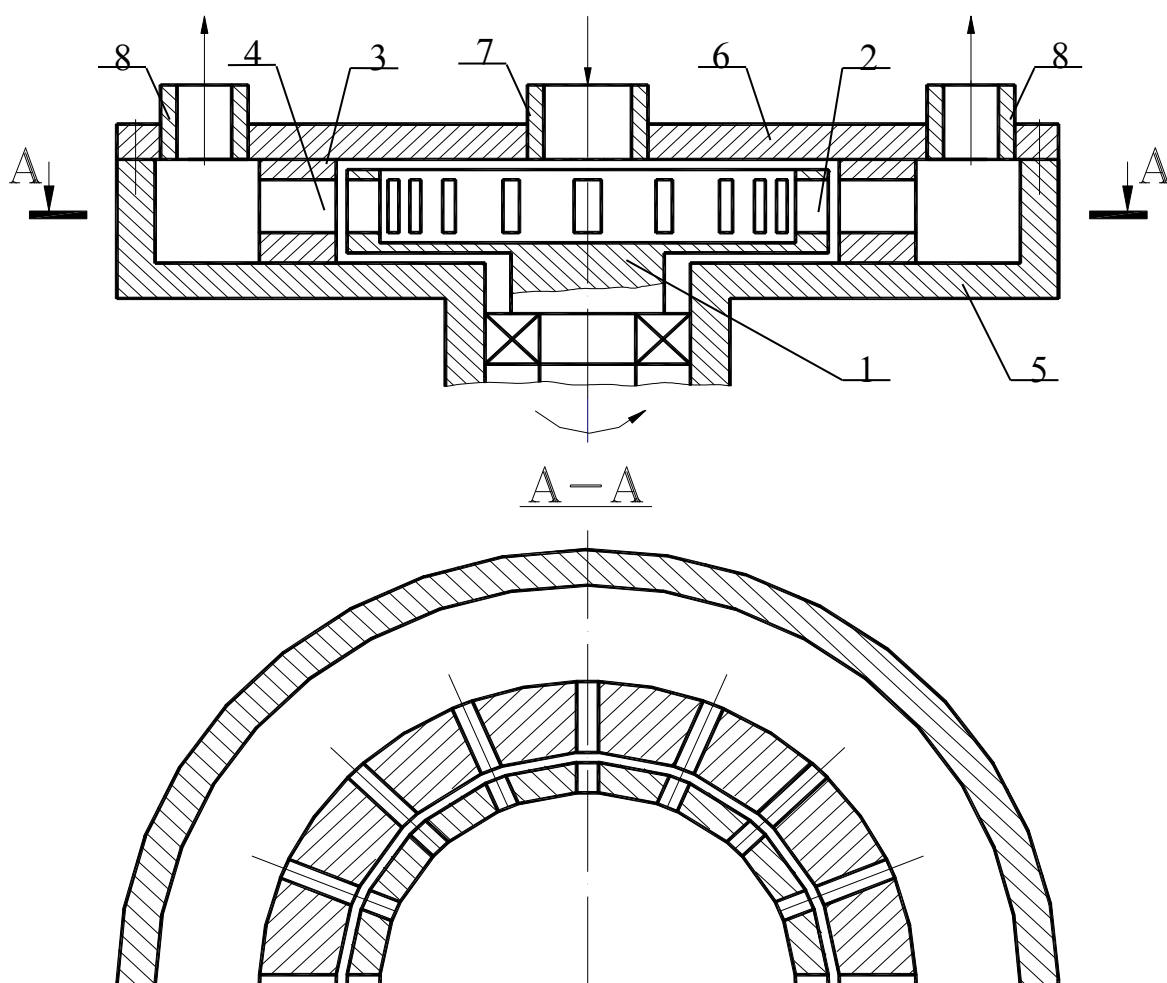


Рис.1 Схема роторного импульсного аппарата:  
1 - ротор; 2 - каналы ротора; 3 - статор; 4 - каналы статора;  
5 - корпус; 6 - крышка; 7 - входной патрубок;  
8 - выходной патрубок.

При вращении ротора, его каналы периодически совмещаются с каналами статора. Выходя из каналов статора, жидкость собирается в рабочей камере и

выводится через выходной патрубок. В период времени, когда каналы ротора перекрыты стенкой статора, в полости ротора давление возрастает, а при совмещении канала ротора с каналом статора давление за короткий промежуток времени сбрасывается и в результате этого в канал статора распространяется импульс давления. Скорость потока жидкости в канале статора является переменной величиной. При распространении в канале статора импульса избыточного давления, вслед за ним возникает кратковременный импульс пониженного («отрицательного») давления, так как совмещение каналов ротора и статора завершилось, и подача жидкости в канал статора происходит только за счет «транзитного» течения из радиального зазора между ротором и статором. Объем жидкости, вошедший в канал статора, стремится к выходу из канала, и инерционные силы создают растягивающие напряжения в жидкости, что вызывает кавитацию. Кавитационные пузырьки растут при понижении давления до давления насыщенных паров обрабатываемой жидкости при данной температуре, и схлопываются или пульсируют при увеличении давления в канале статора. Часть кавитационных пузырьков выносятся в рабочую камеру.

Акустическая кавитация представляет собой эффективное средство концентрации энергии звуковой волны низкой плотности в высокую плотность энергии, связанную с пульсациями и захлопыванием кавитационных пузырьков. В фазе разрежения акустической волны в жидкости образуется разрыв в виде полости, которая заполняется насыщенным паром данной жидкости. В фазе сжатия под действием повышенного давления и сил поверхностного натяжения полость захлопывается, а пар конденсируется на границе раздела фаз. Через стены полости в нее диффундирует растворенный в жидкости газ, который затем подвергается сильному адиабатическому сжатию. В момент схлопывания, давление и температура газа достигают значительных величин (по расчетным данным до 100 МПа и 1000 °С). После схлопывания полости в окружающей жидкости распространяется сферическая ударная волна, быстро затухающая в пространстве.

В связи с тем, что скорость потока жидкости в канале статора велика и имеет флуктуации, поток имеет развитую турбулентность. При вращении ротора в зазоре между ротором и статором возникают большие сдвиговые напряжения. Рабочие поверхности ротора и статора воздействуют на жидкую гетерогенную среду за счет механического контакта, создавая большие срезающие и сдвиговые усилия.

При расчете РИА необходимо различать две задачи: расчет и проектирование универсального аппарата, предназначенного для проведения гидромеханических и тепло-массообменных процессов в жидких средах; расчет и проектирование аппарата, предназначенного для конкретного технологического процесса. При решении первой задачи, когда проектируется многофункциональный аппарат, в расчет необходимо принимать, в первую очередь, натуральные и относительные критерии, а затем уже экономические, то есть, сначала необходимо оперировать критериями, показывающими

техническую и технологическую эффективность, а затем при прочих равных условиях минимизировать затраты на изготовление аппарата. При решении второй задачи, когда технологическая цепочка и технологический цикл полностью определены, необходимо проводить расчет с использованием экономических критериев, например, сроком окупаемости капитальных вложений и чистым дисконтированным доходом.

Универсальные РИА обычно используются в малотоннажном производстве с широким спектром номенклатуры производимого продукта и для решения исследовательских задач. В крупном промышленном производстве, а также, когда оправдано применение аппарата для проведения только одного технологического процесса, наиболее эффективным является использование специально спроектированного РИА для данного технологического процесса. Универсальные РИА проектируются таким образом, чтобы были задействованы и давали наибольшую отдачу основные факторы воздействия на жидкую гетерогенную обрабатываемую среду.

При проектировании РИА ставится задача выбора основного оптимизирующего критерия. Наиболее часто РИА рассчитывают по критерию наибольшего воздействия на обрабатываемую среду при наименьших затратах на потребляемую энергию при заданной производительности. В качестве параметра, определяющего степень воздействия на обрабатываемую жидкость можно принять амплитуду импульса давления, генерируемого в канал статора.

Импульсное давление, генерируемое в канал статора РИА определяется по формуле:

$$P_{\dot{e}}(t) = \rho \frac{dV}{dt} \left[ \frac{S_0}{2\pi} \right]^{0.5}, \quad (1)$$

где  $S_0 = a_c \cdot h_c$ ;  $a_c$ ,  $h_c$  - ширина и высота каналов статора, м,  $\rho$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>,  $V$  - скорость жидкости в канале статора, м/с.

Течение потока жидкости в канале статора РИА описывается нестационарным уравнением Бернулли:

$$\beta \cdot l_y \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{V^2}{2} \left( \xi(t) + \frac{B(t) \cdot \mu}{d_y \cdot \rho \cdot V} \right) = \frac{\Delta P(t)}{\rho}, \quad (2)$$

где  $\beta$  - коэффициент количества движения;  $l_y$  - длина пути жидкости в прерывателе (рабочие участки каналов ротора и статора и зазор между ротором и статором), м;  $d_y$  - эквивалентный гидравлический диаметр, м;  $\xi(t)$  - суммарный коэффициент местного гидравлического сопротивления,  $B(t)$  - коэффициент гидравлического сопротивления, учитывающий потери напора;  $\rho$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $V$  - скорость потока жидкости по каналу прерывателя, м/с;  $\Delta P(t)$  - перепад давления, Па.

Численное решение этого уравнения позволяет определить зависимости  $dV(t)/dt$ ,  $V(t)$ , а по ним определить значения расходных и динамических параметров потока жидкости. Расчет затрат мощности на работу РИА можно определить по методикам, приведенным в [1-3].

Схема классификации технологических процессов, реализуемых в РИА, приведена на рис. 2.

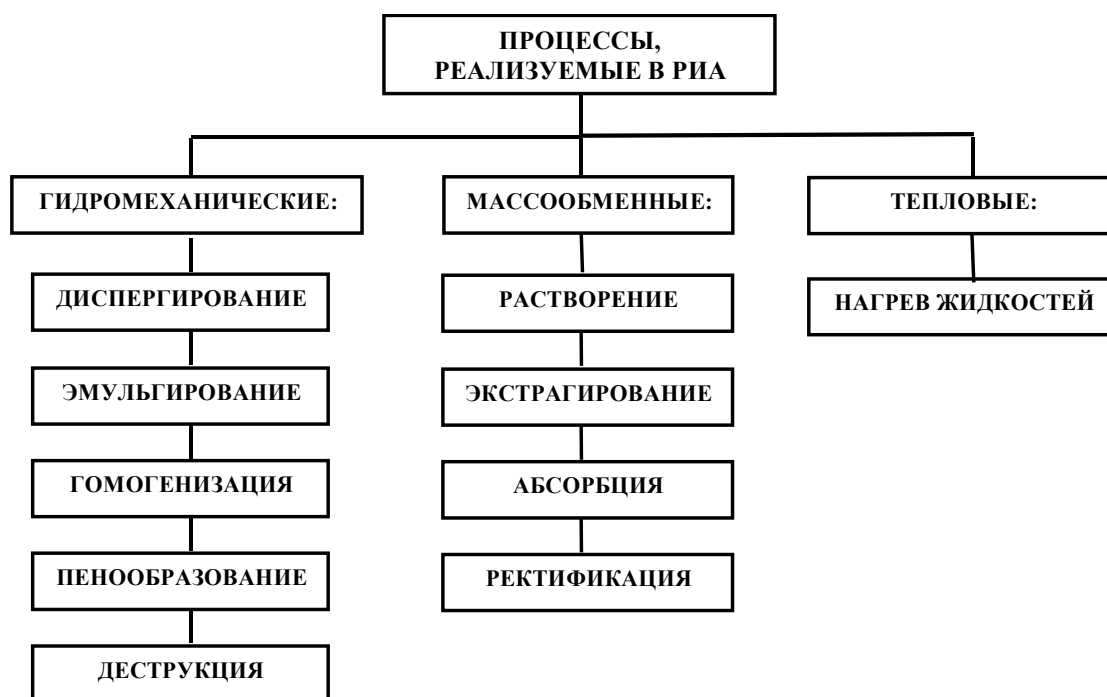


Рис. 2. Схема классификации технологических процессов, реализуемых в РИА.

Технологии и технологические комплексы на базе РИА позволяют получать высококачественные технологические, пищевые и биологически активные растворы экстрактов, эмульсии и суспензии. К таким системам относятся овощные и фруктовые соки, пюре, пасты, майонезы, гомогенизированное и восстановленное молоко, йогурты, мази, кремы, системы содержащие биологически активные вещества (пектин, танин, аминокислоты, вытяжки и экстракты), водо-топливные эмульсии и суспензии; лакокрасочные материалы и т.п. В технологические комплексы кроме РИА входит стандартное оборудование для дозирования, нагнетания и подачи жидкостей и компонентов продукта, их нагрева и охлаждения, емкости предварительного смешивания и временного хранения компонентов.

РИА используется для гомогенизации и пастеризации молока. При гомогенизации молока 90% жировых шариков имеют размер до 2 мкм. Кавитационное воздействие не только способствует повышению дисперсности эмульсии, но и уничтожает вредные микроорганизмы. При обработке молока при температуре 70°C в РИА общее микробное число снижается в  $10^3$ - $10^5$  раз. При этом происходит полное уничтожение вегетативных форм дрожжей и плесеней, а также патогенных микроорганизмов группы кишечной палочки и нейтрализация фосфатазы. Такая обработка позволяет увеличить сроки хранения молока при температуре 9-12°C в неасептической упаковке не менее 5 суток без признаков его скисания. Обработка молока при повышенной

температуре до 123°C позволяет снизить количество колоний бактерий более чем в 10 раз по сравнению с обработкой при температуре 80°C.

Перспективным направлением использования РИА является экстрагирование продуктов микробиологического синтеза, например, пектина, каротина, танина и других ценных веществ из биомассы. Многие лекарственные вещества получают методами экстрагирования при обработке в РИА сырья растительного и животного происхождения. Применение РИА позволяет повысить качество мягких лекарственных форм суспензионного и эмульсионного типа.

Одним из перспективных методов интенсификации процессов экстрагирования веществ из соевого шрота является его обработка в РИА. Соевый шрот содержит до 40-50% протеина, богатого аминокислотами. При обработке соевого шрота в РИА, интенсифицируется процесс экстрагирования, оптимизируется соотношение твердой и жидкой фаз, сокращается время экстрагирования и увеличивается степень извлечения целевых веществ.

РИА нашли применение в решении некоторых технологических и экологических задач ряда производств рыбо-мясоперерабатывающей промышленности и в переработке молочного «обрата», которые связаны с выделением жировой фракции из белково-липидных комплексов (БЛК), содержащих до 30% жира. Технологический и экономический эффект от выделения «связанного» жира из БЛК заключается в получении дополнительной или более качественной продукции (например, казеин с низкой концентрацией жира) и утилизации биологически-активных (пищевых и кормовых) компонентов из сточных вод предприятия.

Проведенные экспериментальные исследования процесса выделения жира при обработке в РИА «подпрессовых» бульонов производства рыбкостной кормовой муки и «обрата», полученного после сепарации цельного молока, показали, что выделение жировой фракции из «обрата» повышается на 70% уже через 10 – 15 минут, а из «подпрессового» бульона - через 20 – 25 минут. По существующим технологиям время выделения жира из БЛК составляет 4 – 10 часов. Кавитационная обработка молочного «обрата» позволяет увеличить процент содержания свободного жира в 3 – 4 раза по сравнению с существующей технологией, а затем провести его сепарацию.

Одним из новых методов повышения реакционной способности крахмала является использование гидродинамического воздействия при обработке клейстиризованного крахмала в РИА. При наложении интенсивных гидродинамических пульсаций и кавитации, скорость кислотного гидролиза клейстиризованного крахмала увеличивается в среднем на три порядка. Основным фактором активации системы является кавитация, структурные изменения в гидрогелях крахмала за счет механического воздействия вызывают увеличение скорости реакции в пределах одного порядка.

Экспериментальные исследования показали высокую эффективность РИА для проведения процессов абсорбции диоксида углерода и диспергирования азота в воде, диспергирования серы в масле,

характеризуемого большой маслянистостью, прозрачностью и отсутствием запаха серы.

Перспективным направлением в энергетике является использование дисперсионно-топливных систем. РИА служат эффективным средством для получения водо-угольных суспензий и угольно-масляных паст. Использование качественных углемазутных суспензий позволяет уменьшить расход мазута на 20-25%. Сжигание углемазутных и водо-угольных суспензий позволяет снизить вредные выбросы ( $\text{CO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ), утилизировать угольный шлам, снизить себестоимость получения тепловой и электрической энергии.

В высоковязких мазутах содержится вода в виде отдельных местных скоплений. Использование в качестве топлива специально приготовленных водо-мазутных эмульсий является одним из эффективных методов, позволяющих решить эту проблему. Одной из применяемых технологий для использования в котлах малой и средней мощности является технология с использованием РИА.

При сжигании водо-мазутных эмульсий получают существенный экономический эффект, повышение КПД на 3-5% и снижение эмиссии загрязняющих веществ ( $\text{CO}$ , сажи, окислов азота, бензапирена и других канцерогенных полициклических ароматических углеводородов) в атмосферу.

Кавитационная обработка водо-мазутной эмульсии с добавлением кальция, и ее последующее сжигание позволяет уменьшить в дымовых газах концентрацию окислов азота в 2-5 раз, концентрацию сернистого ангидрида в 2-3 раза, оксида углерода в 2-2,5 раза. Происходят глубокие структурные изменения в молекулярном составе углеводородов, повышение степени дисперсности асфальтенов, карбенов, карбоидов до размерного ряда частиц 2-3 мкм. Длинные молекулярные цепи преобразовываются в легкие углеводородные радикалы газовых, дистиллятных топливных фракций.

Наибольший экономический эффект и одновременное снижение газовых выбросов обеспечивает добавление в топливо 10-15% воды, а наибольший экологический эффект в части утилизации загрязненных органическими продуктами вод реализуется при уровне водной фазы до 50%.

Обеспечивается возможность сжигания некондиционных высоковязких и обводненных мазутов. В качестве водной фазы можно использовать загрязненные промышленные стоки предприятий. При повышении содержания воды в эмульсии свыше 20% по объему, качественные показатели процесса горения снижаются по сравнению с горением чистого топлива. Однако если учесть, что процесс сгорания ВТЭ достаточно стабилен при более высоком содержании воды (до 40-50%) в зависимости от вида топлива, открывается возможность уничтожения (огневого обезвреживания) жидких стоков производства.

Использование гомогенизированной водо-мазутной смеси позволяет повысить коэффициент сжигания топлива, сэкономить мазут и уменьшить вредные выбросы  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}_x$  в атмосферу при их сжигании. Механизм этого эффекта объясняется следующим обстоятельством. Мазут, поступая в горелку,

распыляется форсункой. Размер каплей мазута составляет порядка 0,1-1 мм. Если в такой капле топлива находятся включения более мелких капелек воды (с диаметром около 1 мкм), то при нагревании происходит вскипание таких капелек с образованием водяного пара. Водяной пар разрывает каплю мазута, увеличивая дисперсность подаваемого в горелку топлива. В результате увеличивается поверхность контакта топлива с воздухом, улучшается качество топливо-воздушной смеси.

Одновременно в факеле происходят каталитические реакции, ведущие к уменьшению вредных газовых выбросов. Возможность снижения количества вдуваемого воздуха при сжигании ВТЭ весьма важна, поскольку КПД котельного агрегата при уменьшении коэффициента избытка воздуха на 0,1% увеличивается на 1%. Время пребывания каплей в реакционном объеме топки возрастает за счет удлинения их траектории в процессе турбулентного перемешивания, увеличивается удельная реакционная поверхность каплей топлива. Скорость сгорания топлива в виде мелких каплей увеличивается и сопровождается выделением меньшего количества твердых продуктов, чем у крупных каплей мазута, разрушаются смолисто-асфальтеновые структуры.

Импульсное энергетическое воздействие на нефть и нефтепродукты позволяет увеличить выход легколетучих фракций при атмосферной перегонке. Применяя импульсное энергетическое воздействие из тяжелой нефти можно получить 20-30% бензина, 40-50% дизельного топлива, 20-30% мазута, битума и других тяжелых товарных продуктов. Кавитационная обработка ускоряет диффузию нефти в полости парафина, интенсифицирует процесс его разрушения. Ускорение растворения парафина идет за счет интенсификации перемешивания нефти на границе нефть-парафин и действия импульсов давления, которые как бы разбрызгивают частицы парафина. Кавитация разрывает непрерывную цепочку, разрушая связи между отдельными частями молекул, влияет на изменение структурной вязкости, т.е. на временный разрыв Ван-дер-ваальсовых связей. Под воздействием кавитации большой интенсивности на протяжении длительного времени нарушаются С-С связи в молекулах парафина, вследствие чего происходят изменения физико-химического состава (уменьшение молекулярного веса, температуры кристаллизации и др.) и свойств нефтепродуктов (вязкости, плотности, температуры вспышки и др.). В процессе импульсной кавитационной обработки нефти и нефтепродуктов энергия, выделяющаяся при схлопывании кавитационных пузырьков, используется для разрыва химических связей между атомами больших молекул углеводородных соединений.

Энергия диссоциации связи С-Н колеблется в зависимости от молекулярной массы и структуры молекулы, в пределах 322-435 кДж/моль, энергия диссоциации связи С-С – 250-348 кДж/моль. При разрыве связи С-Н от углеводородной молекулы отрывается водород, при разрыве связи С-С – углеводородная молекула разрывается на две неравные части. При кавитационной обработке углеводородного сырья происходит деструкция молекул, вызванная микрокрекингом молекул и процессами ионизации. В



результате протекания этих процессов в системе накапливаются «активированные» частицы: радикалы, ионы, ионно-радикальные образования.

Многофакторное импульсное энергетическое воздействие на мазуты позволяет снизить вязкость на 20-30%, увеличить температуру вспышки на 5-10%. После кавитационной обработки в РИА в мазуте образуется до 35% дизельного топлива (температура отгонки 250 – 290°C). Экспериментальные исследования показали, что обработанная в РИА нефть начинает перегоняться под атмосферным давлением при температуре ниже на 10-15°C чем необработанная нефть, 50% необработанной нефти перегоняется при температуре 328°C, а 50% обработанной нефти перегоняется при температуре 265°C под атмосферным давлением, что ниже на 63°C.

Экспериментальные исследования по импульсной многофакторной обработке рапсового и подсолнечного масел в РИА показали, что обработанные масла имеют отличные от исходного масла физико-химические характеристики. Обработанные рапсовое и подсолнечные масла разделяются на фракции различной летучести с большим процентом выхода, отличаются от исходного пониженной вязкостью, повышенной температурой вспышки.

Теплогенераторы на базе РИА – это новое поколение тепловых машин, преобразующих механическое и акустическое воздействия на жидкость в тепло. Нагрев теплоносителя осуществляется при преобразовании кинетической энергии жидкости в тепловую энергию за счет трибоэффекта; преобразовании гидроакустической энергии в тепловую энергию за счет кавитационных и вихревых эффектов.

Кавитационные теплогенераторы могут также использоваться для процесса очистки от накипеобразования, различных отложений и загрязнений на внутренних поверхностях и в труднодоступных местах технологического оборудования и трубопроводов. Кавитационная обработка воды изменяет ее физико-химические свойства, увеличивает рН воды, способствует ее активации. В результате кавитационного воздействия вода временно становится активным растворителем труднорастворимых веществ без введения химических реагентов.

Одной из актуальных задач современной трибологии является разработка новых экономически безопасных смазочных материалов. Так, заменой широко используемых нефтемаслянных базовых смазок могут быть силикато-маслянные составы, представляющие собой многокомпонентные дисперсии коллоидного характера. Одной из проблем при получении таких смазок является приготовление состава с высокой стабильностью. Использование РИА для получения силикатного масла для редукторных механизмов показало его высокую эффективность. По сравнению с лопастной мешалкой, при обработке в РИА относительная стабильность силикатного масла увеличилось в 4-5 раз, испаряемость уменьшилась в 2 раза, время расслаивания увеличилось в 10 раз, время обработки уменьшилось в 7 раз.

Использование РИА для получения смазочно-охлаждающих жидкостей способствует повышению их качества, а также снижает энергозатраты в

процессе их производства. Размер частиц дисперсной фазы получаемых в РИА смазочно-охлаждающих жидкостей достигает 0,8-1,2 мкм, что позволяет уменьшить расход режущего инструмента, повысить качество обработки поверхности, уменьшить коррозию станочного оборудования.

РИА применяется для завершения роспуска волокнистых материалов и для расщепления пучков волокон при переработке грубых волокнистых материалов. Цементно-водная суспензия, подвергнутая кавитационной обработке в РИА и добавленная в бетонную смесь, повышает прочность на сжатие и растяжение изделий из бетона. Использование РИА для получения устойчивых и высокодисперсных эмульсий и паст, вводимых в бетон, позволяет увеличить прочность бетона на 15-20%.

Для получения железобетона с высокими эксплуатационными свойствами для строительных, морских и других сооружений проводят химизацию бетона комплексными добавками. В качестве комплексных добавок смесей из гидрофобилизирующих поверхностно-активных веществ, применяют коллоидную парафиновую пасту. Она представляет собой комплексное соединение двух различных по своей химической природе веществ – воды (полярного растворителя) с парафином (неполярным гидрофобным веществом). Для создания устойчивой системы «парафин - вода» необходима интенсивная обработка, которая достигается при импульсных воздействиях в РИА. После обработки парафиновую пасту вводят в бетономешалку вместе с другими компонентами. При температуре около 60°C частицы парафина переходят в вязко-текучее состояние, заполняя капилляры и поры бетона. При остывании бетона парафин возвращается в первоначальное состояние, придавая бетону водостойкость. Объемная гидрофобизация бетона частицами парафина снижает водопоглощение на 40 – 50 %, повышает его коррозионную стойкость и долговечность в условиях воздействия жидких агрессивных сред.

Таким образом, роторные импульсные аппараты – это перспективное и эффективное оборудование для интенсификации технологических процессов в химической, нефтеперерабатывающей, пищевой, фармацевтической и других отраслях промышленности с высокой степенью воздействия на обрабатываемые вещества.